

**К. Л. НОЗДРАЧОВА**

## **КОМБІНОВАНІ ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ІМПУЛЬСАМИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОВИРОБІВ**

Обґрунтована доцільність застосування безконтактних методів контролю визначення фізико-механічних властивостей металовиробів. Наведено порівняння з сучасними безконтактними методами контролю, визначена перевага застосування ємнісних перетворювачів при даному виді контролю. Розглянута методика і принцип проведення неруйнівного контролю із застосуванням безконтактних комбінованих ультразвукових ємнісних перетворювачів. Описані реалізації комбінованих ємнісних перетворювачів для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль, які дозволять не тільки підвищити ефективність дефектоскопії та чутливість при визначенні неоднорідності пружних характеристик металовиробу вздовж його поверхні, а й забезпечити високу захищеність від когерентних акустичних завад.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, безконтактний перетворювач, ємнісний перетворювач, електричне поле, електричні імпульси, вимірювання, діагностика, поверхневі хвилі.

**Е. Л. НОЗДРАЧЕВА**

## **КОМБИНИРОВАННЫЕ ЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИМПУЛЬСОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН РЕЛЕЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Обоснована целесообразность применения бесконтактных методов контроля определения физико-механических свойств металлоизделий. Приведено сравнение с современными бесконтактными методами контроля, выделено преимущество применения емкостных преобразователей при данном виде контроля. Рассмотрена методика и принцип проведения неразрушающего контроля с применением бесконтактных комбинированных ультразвуковых емкостных преобразователей. Описанные реализации комбинированных емкостных преобразователей для контроля импульсами ультразвуковых поверхностных волн, которые позволят не только повысить эффективность дефектоскопии и чувствительность при определении неоднородности упругих характеристик металлоизделия вдоль его поверхности, но и обеспечить высокую защищенность от когерентных акустических помех.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, бесконтактный преобразователь, емкостной преобразователь, электрическое поле, электрические импульсы, измерения, диагностика, поверхностные волны.

**K. L. NOZDRACHOVA**

## **COMBINED CAPACITY TRANSDUCERS FOR THE TESTING OF THE ULTRASONIC RELAY WAVES OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF METAL PRODUCTS**

Testing of the physical and mechanical properties of materials is one of the important areas of non-destructive quality testing of materials, parts, products and structures. The non-destructive testing allows to pass from selective check of these properties on specially made samples to their one hundred percent control on finished products without their destruction or damage. This increases the reliability of the product quality assessment and reduces costs. The control by acoustic methods is based on the establishment of interrelation of physical-mechanical, technological, structural characteristics of materials and products with their acoustic characteristics. The expediency of application of noncontact methods of testing of determination of physical and mechanical properties of hardware is presented. The comparison with modern noncontact methods of testing is given, the advantage of using capacitive transducers in this type of testing is determined. The technique and principle of non-destructive testing using contactless combined ultrasonic capacitive converters are considered. The implementation of combined capacitive transducers for controlling the pulses of ultrasonic surface waves, which will not only increase the efficiency of flaw detection and sensitivity in determining the heterogeneity of the elastic characteristics of the metal along its surface, but also provide high protection against coherent acoustics.

**Keywords:** ultrasonic testing, noncontact transducer, capacitive transducer, electric field, electrical impulses, measurements, diagnostics, surface waves.

**Вступ.** Контроль фізико-механічних властивостей матеріалів – один з важливих напрямків неруйнівного контролю (НК) якості матеріалів, деталей, виробів та конструкцій. НК дозволяє перейти від вибіркової перевірки цих властивостей на спеціально виготовлених зразках до їх стовідсоткового контролю на готових виробах без їх руйнування або пошкодження. Це підвищує достовірність оцінки якості продукції і скорочує витрати. Контроль акустичними методами заснований на встановленні взаємозв'язку фізико-механічних, технологічних, структурних характеристик матеріалів і виробів з їх акустичними характеристиками [1].

До основних фізико-механічних характеристик матеріалів, що визначаються акустичними методами, відносять: пружні (модуль нормальної пружності, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона); міцності (міцність при різних деформаціях); технологічні (щільність, пластичність, вологість, вміст окремих компонентів, гранулометричний склад і ін.); структурні (анізотропія матеріалу, кристалічність або

аморфність, розміри кристалів, впорядкованість кристалічної решітки); розміри, форма і зміст включень (наприклад, графітних в чавуні); глибина поверхневого гарту і ряд інших.

Акустичні методи дозволяють оцінювати тільки ті властивості матеріалу, які впливають на умови збудження, проходження, відбиття і заломлення пружних хвиль або на режими коливань об'єкта контролю. Це швидкості поширення хвиль різних типів, хвильовий опір матеріалів, коефіцієнти поглинання і розсіювання пружних хвиль, власні частоти конструкцій, їх добротність, механічний імпеданс і ін. Основні з них – швидкості поширення і коефіцієнт загасання пружних хвиль.

Контроль фізико-механічних властивостей акустичними методами заснований на аналітичних або кореляційних зв'язках вимірюваних акустичних параметрів з значеннями оцінюваних властивостей матеріалу. Якщо контролювана властивість має з

вимірюваним параметром чіткий аналітичний зв'язок, вона може бути визначена з високою точністю. Так, усі три пружні постійні матеріалу (модуль Юнга  $E$ , модуль зсуву  $G$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ ) однозначно визначаються по вимірним значенням швидкостей поширення поздовжньої і поперечної об'ємних хвиль. Точність такої оцінки залежить від точності вимірювання зазначених швидкостей і може бути дуже високою [2].

Контроль фізико-механічних властивостей матеріалів часто вимагає вимірювання швидкості і загасання ультразвуку з підвищеною точністю. Це пов'язано з дуже малими змінами деяких інформативних акустичних параметрів при варіації контрольованого параметра в широких межах. Наприклад, зміна твердості або міцності сталі в широких межах змінює швидкість звуку всього на 1 ... 2%. Тому використання стандартних способів вимірювання швидкості звуку, що реалізуються в УЗ-товщиномірах і дефектоскопах, в даному випадку часто не правомірні. Потрібна більш точна апаратура, та нові способи вимірювання коефіцієнта загасання.

Гранична точність вимірювання швидкості відповідає похибці 0,001 ... 0,01%. Точність вимірювання загасання значно нижче. Похибки в 10% вважаються гарним результатом.

Тому пошук нових більш точних і енергозберігаючих методів неруйнівного контролю є актуальною і своєчасною задачею. Так, при безконтактному методі контролю відпадає необхідність застосування контактної рідини і ретельної зачистки поверхні, так як збудження ультразвуку відбувається в поверхневому шарі електропровідного виробу, що прискорює і здешевлює процес контролю.

**Аналіз літературних джерел інформації та постановка проблеми.** Одним з джерел УЗК, який демонструє значну перспективу, є ємнісний безконтактний перетворювач (або електростатичний акустичний перетворювач), але було зібрано мало експериментальних доказів для підтвердження його передбачуваного теоретичного опису [3]. Ємнісні перетворювачі з вузькою смугою пропускання були досліджені для вимірювання абсолютної швидкості без необхідності поправок вимірювань [4–7] для вимірювань зміни температурних властивостей матеріалу [8–12], в той час як широкосмугові ємнісні детектори широко відомі для роботи з акустичною емісією [13–19]. Однак, як широкосмугові джерела, вони не привернули такої уваги. Повідомлялося лише у кількох дослідженнях [20–23], і в двох з них основна увага приділялася впливу електретних матеріалів в міжелектродному проміжку [21, 22]. Робився наголос на характеристику джерела, хоча, передбачалося, що перетворення електричної енергії в акустичну відбувається через електростатичну силу на поверхні зразка.

В одній з цитованих робіт [20] було проведено порівняльне дослідження семи ультразвукових джерел, основний інтерес яких полягав у пошуку стандартного джерела для калібрування систем

виявлення акустичної емісії. Широкосмуговий ємнісний перетворювач був одним з досліджених джерел і, незважаючи на його знижену чутливість, показав багато примітних аспектів продуктивності. Однак в цій роботі і до наших днів не досліджувалися ефекти зміни напруги збудження і накладеного зміщення або поведінки поза епіцентру. Тому, більш детальне дослідження широкосмугового ємнісного перетворювача є актуальним завданням.

У різних областях ультразвукової дефектоскопії використовуються зразки, призначені для настройки чутливості глибиномірних пристроїв дефектоскопів, визначення похибок товщиномірів і структуроскопії, передачі розміру одиниць швидкості поширення і коефіцієнта загасання УЗ коливань і т.д. Основними параметрами всіх типів зразків є або швидкість або загасання, або те й інше. Залежно від класу приладу накладаються певні вимоги на однорідність зразків по швидкості і загасання. Наприклад, для налаштування дефектоскопів досить, щоб неоднорідність не перевищувала 0,5% за швидкістю [24] і 10–20% по загасання; для товщиномірів і структуроскопії 0,1% [25] 5–10% відповідно. Для стандартних зразків, призначених для передачі розміру одиниць швидкості і коефіцієнта загасання, ці вимоги ще більш жорсткі.

Для вимірювання коефіцієнта загасання і швидкості поширення поздовжніх УЗ хвиль в твердих середовищах і передачі засобом вимірювань нижчого розряду розміру одиниць цих фізичних величин розроблена установка описана в [26–33]. Вона дозволяє також вимірювати групову швидкість поширення зсувних хвиль. В установці ІЗУ-1 реалізований ємнісний метод генерації і прийому УЗ коливань, заснований на застосуванні ємнісних перетворювачів (ЕП) з тонкоплівкових оксидних діелектриком.

При вирішенні ряду прикладних задач виникає необхідність визначення акустичних параметрів в об'єктах, що мають малу товщину [34]. У цьому випадку застосування традиційних луна-імпульсних методів недоцільно, так як для тонких зразків вони не забезпечують необхідну точність вимірювання, а іноді їх просто неможливо реалізувати. Тому, для проведення вимірювань даної складності розробляються нові методи і засоби, де в якості випромінювача і приймача ультразвукових коливань все частіше застосовують ємнісні перетворювачі [34–36], які мають широку смугу випромінювання і прийому ультразвукових імпульсів, а так само головною перевагою яких є безконтактність проведення контролю. При цьому, отримані результати показують [37], що ємнісний метод дозволяє визначити якість тонкостінних виробів, в разі, коли застосування оптичних або радіаційних методів - традиційних для подібних об'єктів, неможливо. Так само в [35, 37] описується можливість і актуальність використання ємнісних перетворювачів для прийому релеєвських хвиль і хвиль Лемба, збуджуваних будь-якими методами.

Підвівши підсумки робіт [34–37] в даному напрямку висока складність методик і необхідність

врахування безлічі різних факторів в процесі проведення вимірювань, що в свою чергу тягне за собою необхідність пред'явлення дуже високих вимог до операторів еталонних установок. В роботі [38] було розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення, що дозволяє використовувати існуючі та розроблювані еталонні установки в сукупності з сучасними цифровими приладами з метою освіти інформаційно-вимірювального комплексу по визначенню параметрів поширення різних типів акустичних хвиль в твердих середовищах. Автором запропоновано ряд методик вимірювань. Для імпульсного режиму запропоновані методики знаходження швидкості зсувної складової імпульсу при наявності перешкоди, методика визначення частотної залежності швидкості поширення і коефіцієнта загасання УЗ коливань. Для резонансного режиму запропонована методика визначення додаткової дифракційної поправки при знаходженні коефіцієнта загасання, а також методика визначення коефіцієнта загасання і швидкості ультразвукових коливань при наявності перешкоди, що залежить від частоти (при значеннях коефіцієнта загасання до 2000 дБ / м). Запропоновані методики дозволяють підвищити точність, а також розширити діапазон вимірювань відповідних фізичних величин. Тому реалізація ємнісного методу ультразвукового контролю вимірювання фізичних величин електровиробів у більш спрощеному варіанті, який дозволяв би проводити контроль і обробляти сигнали з достатньою точністю являється досить актуальною проблемою.

**Мета роботи:** розробка безконтактних ємнісних перетворювачів ультразвукового контролю для визначення дефектів і неоднорідності фізико-механічних характеристик металів з високою достовірністю за допомогою акустичних імпульсів.

**Основна частина.** Методика проведення безконтактного контролю за допомогою застосування ємнісних перетворювачів полягає в тому, що в електропровідному виробі 1 (рис. 1) наводяться ультразвукові хвилі 2, які виникають в результаті перетворення електричної енергії в ультразвукову (механічну) [39]. Високочастотні електричні імпульси подаються на металеву пластину (як одну з обкладок перетворювача) 3, що має діелектричний прошарок 4, з генераторів постійної 5 та змінної 6 напруг. Блок управління 7 задає управляючий сигнал на синхронізатор імпульсів 8, який керує часом запуску генераторів 5 і 6, в результаті у виробі виникають ультразвукові імпульси заданої частоти та заповнення. Прикладання до пластини перетворювача постійної напруги необхідно для виключення подвоєння частоти, а змінної напруги для збудження ультразвукових хвиль. Має місце і зворотній ефект, коли ємнісним перетворювачем можна приймати ультразвукові імпульси і перетворювати їх в електричні сигнали, які надходять на підсилювач 9, перед яким включена роздільна ємність  $C_1$ . З підсилювача 9, імпульси, через блок управління 7 візуалізуються на екрані 10 дефектоскопа чи осцилографу.

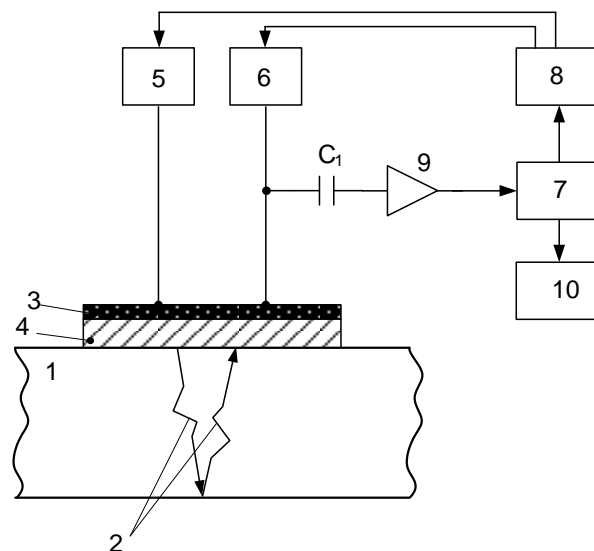


Рис. 1 – Блок-схема реалізації методики контролю ємнісним методом ультразвукового неруйнівного контролю

Другою обкладкою ємнісного перетворювача служить сам об'єкт контролю 1, або стандартний зразок, по якому відбувається настроювання макета приладу. Тому, верифікацій такого перетворювача може бути досить багато за рахунок зміни його конструкції і призначення. Наприклад, було розроблено перетворювачі, що випромінюють хвилі

Релея, приклад яких наведено на рис. 2, рис. 3, що дозволяє підвищити точність визначення фізико-механічних характеристик металу за рахунок відносного методу вимірювання двома ідентичними приймаючими високочастотними полосковими електродами.

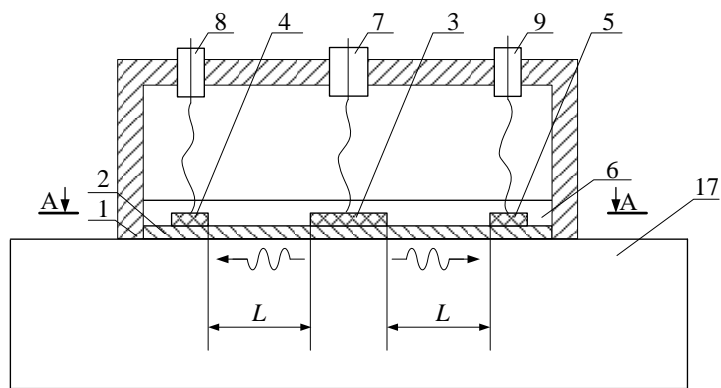


Рис. 2 – Схематичне зображення комбінованого ємнісного перетворювача для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль та його розміщення на ОК

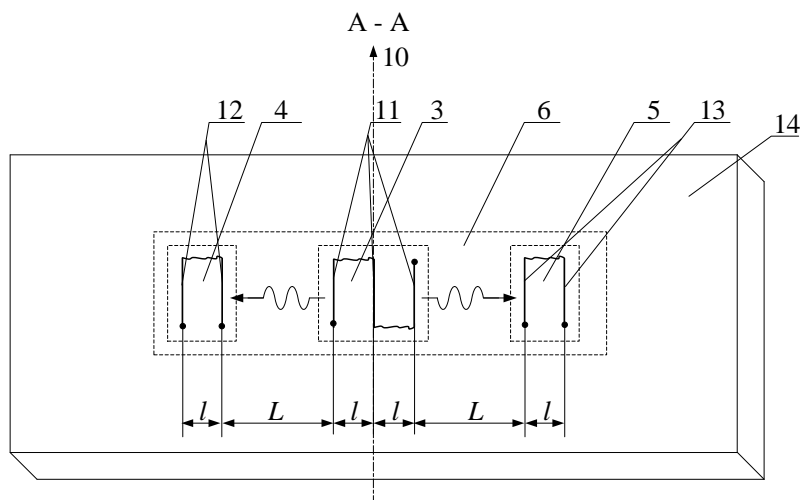


Рис. 3 – Схематичне розташування в неелектропровідній неферомагнітній основі над поверхнею ОК секцій полоскових електродів комбінованого ЄП для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль.

ЄП працює наступним чином. ЄП, який має корпус 1, розташовують над поверхнею ОК 14, як це зображено на рис. 1. Через з'єднувач 7 на секцію 3 з полосковими елементами 11 подається постійна висока напруга і імпульсна напруга. В поверхневому шарі ОК 14 за рахунок взаємодії постійного і імпульсного електричних полів збуджуються імпульси поверхневих хвиль, які поширюються в обидві сторони від секції 3. Через з'єднувачі 8 і 9 на полоскові елементи 12 та 13 подається постійна висока напруга. При однаковій відстані  $L$  між секціями 4 і 5 та при однакових властивостях поверхні виробу ОК 14 на полоскових елементах 12 і 13 що розташовуються паралельно на відстані  $l$  секцій 4 і 5 відповідно збуджується ЕРС з однаковою фазою. При відмінності фізико-механічних властивостей поверхневих шарів ОК 14 між секцією 3 та секціями 4

і 5 на полоскових елементах 12 і 13 збуджується ЕРС з різними фазами. Величина відмінності фаз визначає відмінність фізико-механічних властивостей поверхневих шарів ОК 14, що знаходяться між секціями 3 та 4 і 5. Стрілками позначено напрямки поширення імпульсів збуджених ультразвукових хвиль. Протектор 2 захищає ЄП від пошкоджень під час механічного сканування поверхні ОК 14.

На рис. 4 наведена друга реалізація ємнісного перетворювача, що має високу захищеність від когерентних акустичних завад за рахунок орієнтації довгих частин 12 і 13 полоскових елементів секцій 4 і 5 на відстані  $l$  між збуджуючою та приймальною секціями ЄП і орієнтації полоскових елементів секцій 4 і 5 під кутами  $70^\circ + 10^\circ$ . Окрім того, поверхня ОК 14 сканується тільки в одній його частині в напрямку осі 10.

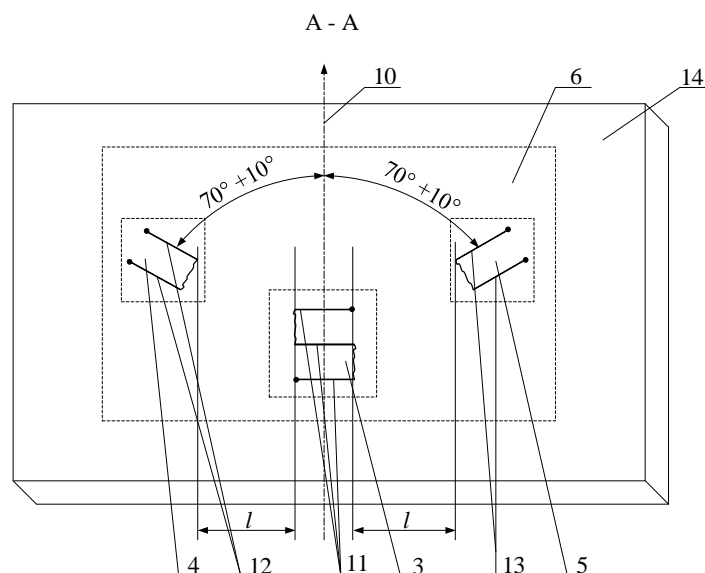


Рис. 4 – Схематичне розташування секцій полоскових електродів ЄП на поверхні ОК та орієнтація полоскових електродів

Представлений на рис. 5, рис. 6 підвищити ефективність ультразвукового контролю широкопугвий ємнісний перетворювач для за рахунок виконання відстаней між полосковими контролю електропровідних виробів імпульсами електродами ЄП змінними в заданому інтервалі. ультразвукових поверхневих хвиль дозволяє

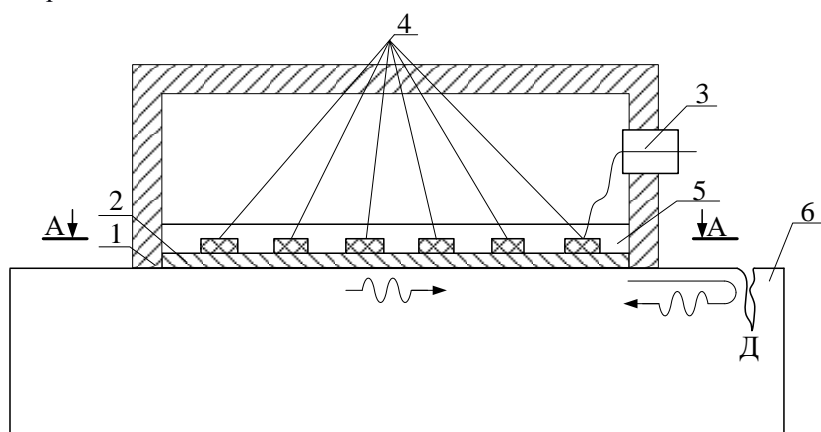


Рис. 5 – Схематичне зображення широкопугового ЄП для контролю електропровідних виробів імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль та його розміщення на ОК

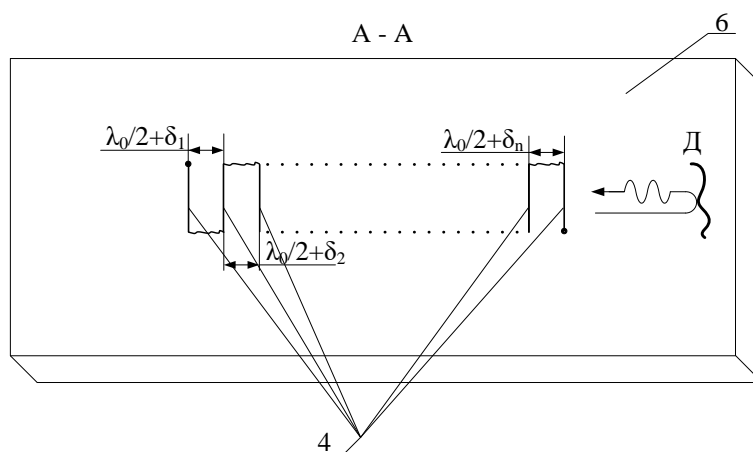


Рис. 6 – Схематичне зображення розташування на поверхні ОК полоскових електродів ЄП



ЄП працює наступним чином. ЄП, який має корпус 1, який розташовують над поверхнею ОК 6, як це зображено на рис. 5. Через з'єднувач 3 на полоскові електроди 4, що розміщені в неелектропровідній неферромагнітній основі, подається постійна і імпульсна напруги, які створюють в поверхневому шарі ОК 6 постійне і імпульсне електричне поле. Взаємодія цих полів приводить до збудження в поверхневому шарі ОК 6 імпульсів поверхневих ультразвукових хвиль, які поширюються вздовж поверхні ОК 6, як це показано стрілками на кресленнях. Найбільш потужним буде ультразвуковий імпульс, при якому напівдовжина збудженої ультразвукової хвилі буде рівною відстані між двома сусідніми полосковими електродами перетворювача. Якщо пружні властивості поверхні виробу зміняться із-за неоднорідності хімічного стану матеріалу, зміни температури, хвилястості поверхні тощо, то потужні імпульси поверхневих хвиль будуть збуджувати інші полоскові електроди. Таким чином перекривається весь діапазон можливих змін факторів, що можуть впливати на збудження імпульсів ультразвукових хвиль в виробах, близьких за властивостями. В результаті ефективність неруйнівного контролю підвищиться.

При реєстрації ультразвукових імпульсів відбитих від дефекту  $D$  реалізується аналогічний селективний процес. Завжди знайдеться пара сусідніх полоскових електродів, відстань між якими співпадає з напівдовжиною відбитої ультразвукової хвилі. Амплітуда прийнятого імпульсу збільшиться. Тобто, і при реєстрації поверхневих ультразвукових хвиль ефективність неруйнівного контролю підвищиться.

**Висновки.** Реалізація першого представленого на рис. 2, рис. 3 комбінованого ємнісного перетворювача для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль дасть змогу підвищити чутливість до різниці характеристик металу вздовж його поверхні, що має суттєве значення при виготовленні виробів з використанням обробки тиском – прокатки, штампування тощо.

Особливості конструкції другого типу ємнісного перетворювача рис. 4 дають можливість мати високу захищеність від когерентних акустичних завад.

Третя розробка перетворювача (рис. 5, рис. 6) направлена на підвищення ефективності при дефектоскопії, що має суттєве значення при постачанні споживачам якісних виробів.

#### Список літератури

1. Денисов Л.С., Контроль и управление качеством сварочных работ : учеб. пособие / Л.С. Денисов - Минск : Выш. шк., 2016. - 619 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2006. - 864 с.
3. H. Carr, W.S.H. Munro, M. Rafiq and C. Wykes, 'Developments in capacitive transducers', Nondest. Test. Eval. 10, 3-14 (1992)
4. J. H. Cantrell, Jr. and M. A Breazeale, "Elimination of transducer bond corrections in accurate ultrasonic-wave velocity measurements by use of capacitive transducers," J. Acoust Soc. Am. 61, 403-405 (1977).

5. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "A capacitive driver for measurement of ultrasonic wave velocity in solids," Proc. IEEE. Ultra. Symp., Cat. #74 CHO 596-ISU, 537-539 (1974).
6. E. I. Chem, J. H. Cantrell, Jr., and J. S. Heyman, "Improved formula for continuous-wave measurements of ultrasonic phase velocity," J. Appl. Phys. 52, 3200-3204 (1981).
7. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "Ultrasonic investigation of the nonlinearity of fused silica for different hydroxyl-ion contents and homogeneities between 300 and 3 °K," Phys. Rev. B 17(12), 4864-4870 (1978).
8. W. A. Aiello, C. R. Wolfe, and W. A. Little, "Simplified vibrating-reed technique for the measurement of the temperature dependence of Young's modulus of small samples," Rev. Sci. Instrum. 54(5), 594-596 (1983).
9. J. W. Brill, "Elastic anomalies at the charge density wave transition in TaS<sub>3</sub>," Solid. St Commun 41(12), 925-929 (1982).
10. D. W. Schindel, D. A. Hutchins, and S. Smith, "A study of materials at high temperature using miniaturized resonant tuning forks," J. Acoust. Soc. Am. 92, 2314(A) (1992).
11. B. Golding, "Thermal expansivity of RbMnF<sub>3</sub> near TN," J. Appl. Phys. 42(4), 1381-1382 (1971).
12. T. Tiedje, R. R. Haering, and W. N. Hardy, "The application of capacitive transducers to sound velocity measurements in TTF-TCNQ," J. Acoust. Soc. Am. 65, 1171-1181 (1979).
13. C. B. Scruby and H. N. G. Wadley, "A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission," J. Phys. D: Appl. phys. 11, 1487-1494 (1978).
14. F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg, and M. Greenspan, "Acoustic emission; some applications of Lamb's problem," J. Acoust. Soc. Am. 57(3), 626-631 (1975).
15. F. R. Breckenridge and M. Greenspan, "Surface-wave displacement: Absolute measurements using a capacitive transducer," J. Acoust. Soc. Am. 69, 1177-1185 (1981).
16. D. A. Hutchins and J. D. Macphail, "A new design of capacitance transducer for ultrasonic displacement detection," J. Phys. E: Sci. Instrum. 18, 69-73 (1985).
17. K. Y. Kira and W. Sachse, "Self-aligning capacitive transducer for the detection of broadband ultrasonic displacement signals," Rev. Sci. Instrum. 57(2), 264-267 (1986).
18. K. Y. Kim, L. Niu, B. Castagnede, and W. Sachse, "Miniaturized capacitive transducer for detection of broadband ultrasonic displacement signals," Rev. Sci. Instrum. 60(8), 2785-2788 (1989).
19. G. E. Sieger and H. W. Lefevre, "Time-resolved measurement of acoustic pulses generated by MeV protons stopping in aluminum," Phys. Rev. A 31(6), 3929-3936 (1985).
20. F. R. Breckenridge, T. M. Proctor, N. N. Hsu, S. E. Fide, and D. G. Eitzen, "Transient sources for acoustic emission work," NIST internal report (1990).
21. D. Legros and I. Lewiner, "Electrostatic ultrasonic transducers and their utilization with foil electrets," J. Acoust. Soc. Am. 53, 1663-1672 (1973).
22. D. Legros, J. Lewiner, and P. Biquard, "Generation of ultrasound by a dielectric transducer," J. Acoust Soc. Am. 52(1, Pt. 2), 196-198 (1972).
23. D. W. Schindel and D. A. Hutchins, "A wideband capacitance transducer source," Proc. Ultrason. Inter. Symp. 589-593 (1989).
24. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые Дата введения 2015-07-01 М.: Стандартинформ, 2014
25. ДСТУ ГОСТ 8.495:2009 ГСИ. Толщиномеры ультразвуковые контактные. Методы и средства поверки (ГОСТ 8.495-83).
26. Архипов В.И. О качестве образцов для ультразвуковых измерений / В.И. Архипов, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. - 1991. - № 10. - С. 41-48.
27. Кондратьев А.И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред. В двух частях. - Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. - 2006. - 152 с.
28. Кондратьев А. И. Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах / А. И. Кондратьев, А. А. Кондратьев, В. И. Римлянд, К. А. Драчёв // Вестник ТОГУ. - 2013. № 4(31). - С. 17-24.
29. Кондратьев А.И. Емкостный широкополосный датчик сигналов акустической эмиссии / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Акустическая эмиссия. Неразрушающий контроль : IV междунар. конф. : тезисы докл. - Москва, 1998 - С. 47.
30. Луговой В.А. Широкополосный емкостный приемник

акустических сигналов / В.А. Луговой // Сейсмоакустика переходных зон : материалы 3-го Всероссийского симпозиума. - Владивосток, 2003. - С.56–58.

31. Пат. RU 2137118, МПК G 01 N 27/22. Самокалибрующийся емкостной преобразователь / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120210/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 10.09.1999.
32. Пат. RU 2140072, МПК G 01 N 27/22. Способ контроля и стабилизации чувствительности емкостного преобразователя / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120202/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 20.10.1999.
33. Король, Андрей Александрович. Алгоритмическое и программное обеспечение измерительного комплекса для определения параметров распространения различных типов акустических волн в твердых средах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.16 / Король Андрей Александрович; [Место защиты: Тихоокеан. гос. ун-т]. - Хабаровск, 2011. - 140 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2448.
34. M. Platte, 'PVDf ultrasonic transducers for ultrasonic testing', *Ferroelectrics* 115, 229-246 (1991)
35. M. Tone, T. Yano and A. Fukumoto, 'High-frequency ultrasonic transducer operating in air', *Japan. J. Appl. Phys.* 23, L436-L438 (1984)
36. C.M. Fortunko, R.E. Schramm, C.M. Teller, G.M. Light, J.D. McColskey, W.P. Dubé and M.C. Renken, 'Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging', *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval. Vol. 14A and 14B, Ch. 312*, 951-958 (1995)
37. W. Manthey, N. Kroemer and V. Mágóri, 'Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air', *Meas. Sci. Technol.* 3, 249–261 (1992)
38. T.R. Gururaja, W.A. Schulze, L.E. Cross and R.E. Newnham, 'Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part II: Evaluation of ultrasonic medical applications', *IEEE Trans. Son. Ultrason. SU* 32, 499–513 (1985)
39. Ноздрачева Е.Л. Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем / Ноздрачева Е.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Красноармійськ. – №1(28)'2015. – С. 165–170.
40. B. Golding, "Thermal expansivity of RbMnF<sub>3</sub> near TN," *J. Appl. Phys.* 42(4), 1381–1382 (1971).
41. T. Tiedje, R. R. Haering, and W. N. Hardy, "The application of capacitive transducers to sound velocity measurements in TTF-TCNQ," *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 1171–1181 (1979).
42. C. B. Scruby and H. N. G. Wadley, "A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission," *J. Phys. D: Appl. phys.* 11, 1487–1494 (1978).
43. F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg, and M. Greenspan, "Acoustic emission; some applications of Lamb's problem," *J. Acoust. Soc. Am.* 57(3), 626–631 (1975).
44. F. R. Breckenridge and M. Greenspan, "Surface-wave displacement: Absolute measurements using a capacitive transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 1177–1185 (1981).
45. D. A. Hutchins and J. D. Macphail, "A new design of capacitance transducer for ultrasonic displacement detection," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 18, 69–73 (1985).
46. K. Y. Kira and W. Sachse, "Self-aligning capacitive transducer for the detection of broadband ultrasonic displacement signals," *Rev. Sci. Instrum.* 57(2), 264–267 (1986).
47. K. Y. Kim, L. Niu, B. Castagnede, and W. Sachse, "Miniaturized capacitive transducer for detection of broadband ultrasonic displacement signals," *Rev. Sci. Instrum.* 60(8), 2785–2788 (1989).
48. G. E. Sieger and H. W. Lefevre, "Time-resolved measurement of acoustic pulses generated by MeV protons stopping in aluminum," *Phys. Rev. A* 31(6), 3929–3936 (1985).
49. F. R. Breckenridge, T. M. Proctor, N. N. Hsu, S. E. Fide, and D. G. Eitzen, "Transient sources for acoustic emission work," NIST internal report (1990).
50. D. Legros and I. Lewiner, "Electrostatic ultrasonic transducers and their utilization with foil electrets," *J. Acoust. Soc. Am.* 53, 1663–1672 (1973).
51. D. Legros, J. Lewiner, and P. Biquard, "Generation of ultrasound by a dielectric transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* 52(1, Pt. 2), 196–198 (1972).
52. D. W. Schindel and D. A. Hutchins, "A wideband capacitance transducer source," *Proc. Ultrason. Inter. Symp.* 589–593 (1989).
53. GOST R 55724-2013 Kontrol' nerazrushayushchiy. Soyedineniya svarnyye. Metody ul'trazvukovyye Data vvedeniya 2015-07-01 Moscow: Standartinform, 2014.
54. DSTU GOST 8.495:2009 GSI. Tolshchinomery ul'trazvukovyye kontaktnyye. Metody i sredstva poverki (GOST 8.495-83)
55. 26 Arkhipov V.I. O kachestve obraztsov dlya ul'trazvukovykh izmereniy / V.I. Arkhipov, A.I. Kondrat'yev // Defektoskopiya. – 1991. – No 10. – P. 41–48.
56. Kondrat'yev A.I. Pretsizionnyye metody i sredstva izmereniya akusticheskikh velichin tverdykh sred. V dvukh chastyakh. – Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS. – 2006. – 152 p.
57. Kondrat'yev A. I. Izmereniye skorosti rasprostraneniya i koeffitsiyenta zatukhaniya prodol'nykh voln v tonkikh obraztsakh / A. I. Kondrat'yev, A. A. Kondrat'yev, V. I. Rimlyand, K. A. Drachov // Vestnik TOGU. – 2013. No 4(31). – P. 17–24.
58. Kondrat'yev A.I. Yemkostnyy shirokopolosnyy datchik signalov akusticheskoy emissii / A.I. Kondrat'yev, V.A. Lugovoy // Akusticheskaya emissiya. Nerazrushayushchiy kontrol' : IV mezhdunar. konf. : tezisy dokl. – Moscow, 1998 – P. 47.
59. Lugovoy V.A. Shirokopolosnyy yemkostnyy priyemnik akusticheskikh signalov / V.A. Lugovoy // Seysmoakustika perekhodnykh zon : materialy 3-go Vserossiyskogo simpoziuma. - Vladivostok, 2003. - P.56–58.
60. Pat. RU 2137118, МПК G 01 N 27/22. Samokalibruyushchiysya yemkostnoy preobrazovatel' / Kondrat'yev A.I., Rimlyand V.I., Kazarbin A.V.; yayavitel' i patentoobladatel' : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet – No 97120210/28 ; yayav. 04.12.1997; opubl. 10.09.1999.
61. Pat. RU 2140072, МПК G 01 N 27/22. Sposob kontrolya i stabilizatsii chuvstvitel'nosti yemkostnogo preobrazovatelya / Kondrat'yev A.I., Rimlyand V.I., Kazarbin A.V.; yayavitel' i patentoobladatel' : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet – No 97120202/28 ; yayav. 04.12.1997; opubl. 20.10.1999.
62. Korol', Andrey Aleksandrovich. Algoritmicheskoye i programnoye obespecheniye izmeritel'nogo kompleksa dlya opredeleniya parametrov rasprostraneniya razlichnykh tipov akusticheskikh voln v tverdykh sredakh : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.11.16 / Korol' Andrey Aleksandrovich;

#### References (transliterated)

1. Denisov L. Kontrol' i upravleniye kachestvom svarochnykh rabot: ucheb. posobiye / L.S. Denisov - Minsk: Vysh. shk., 2016. - 619 p.
2. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. Vol. 3: Ul'trazvukovoy kontrol' / I.N. Yermolov, Yu.V. Lange. - Moscow: Mashinostroyeniye, 2006. - 864 p.
3. H. Carr, W.S.H. Munro, M. Rafiq and C. Wykes, 'Developments in capacitive transducers', *Nondest. Test. Eval.* 10, 3–14 (1992)
4. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "Elimination of transducer bond corrections in accurate ultrasonic-wave velocity measurements by use of capacitive transducers," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 403–405 (1977).
5. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "A capacitive driver for measurement of ultrasonic wave velocity in solids," *Proc. IEEE. Ultra. Symp., Cat. #74 CHO 596-1SU*, 537–539 (1974).
6. E. I. Chem, J. H. Cantrell, Jr., and J. S. Heyman, "Improved formula for continuous-wave measurements of ultrasonic phase velocity," *J. Appl. Phys.* 52, 3200–3204 (1981).
7. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "Ultrasonic investigation of the nonlinearity of fused silica for different hydroxyl-ion contents and homogeneities between 300 and 3 °K," *Phys. Rev. B* 17(12), 4864–4870 (1978).
8. W. A. Aiello, C. R. Wolfe, and W. A. Little, "Simplified vibrating-reed technique for the measurement of the temperature dependence of Young's modulus of small samples," *Rev. Sci. Instrum.* 54(5), 594–596 (1983).
9. J. W. Brill, "Elastic anomalies at the charge density wave transition in TaS<sub>3</sub>," *Solid. St Commun* 41(12), 925–929 (1982).
10. D. W. Schindel, D. A. Hutchins, and S. Smith, "A study of materials at high temperature using miniaturized resonant tuning forks," *J. Acoust. Soc. Am.* 92, 2314(A) (1992).

- [Mesto zashchity: Tikhookean. gos. un-t].- Khabarovsk, 2011.- 140 s.: il. RGB OD, 61 11-5/2448.
34. M. Platte, 'PVDF ultrasonic transducers for ultrasonic testing', *Ferroelectrics* 115, 229–246 (1991)
  35. M. Tone, T. Yano and A. Fukumoto, 'High-frequency ultrasonic transducer operating in air', *Japan. J. Appl. Phys.* 23, L436-L438 (1984)
  36. C.M. Fortunko, R.E. Schramm, C.M. Teller, G.M. Light, J.D. McColskey, W.P. Dubé and M.C. Renken, 'Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging', *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval. Vol. 14A and 14B, Ch. 312*, 951–958 (1995)
  37. W. Manthey, N. Kroemer and V. Mágori, 'Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air', *Meas. Sci. Technol.* 3, 249–261 (1992)
  38. T.R. Gururaja, W.A. Schulze, L.E. Cross and R.E. Newnham, 'Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part II: Evaluation of ultrasonic medical applications', *IEEE Trans. Son. Ultrason. SU* 32, 499–513 (1985)
  39. Nozdracheva Ye.L. Osobennosti возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем / Nozdracheva Ye.L., Suchkov G.M., Petrishchev A.N. // *Nauchnyye trudy Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Vychislitel'naya tekhnika i avtomatizatsiya»*. - Krasnoarmeysk. - No1 (28) '2015. - P. 165–170.

Надійшла (received) 30.11.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ноздрачова Катерина Леонідівна (Ноздрачева Екатерина Леонидовна, Nozdrachova Katerina Leonidivna)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0002-1996-2301, e-mail: nozdrachova@gmail.com.